

Esquemas de Seleção de Relay para Redes Cooperativas-Cognitivas Full Duplex sob o Protocolo Decodifica-e-Encaminha

Daniel de Paiva Mucin, Edgar Eduardo Benitez Olivo e Diana Pamela Moya Osorio

Resumo— Neste artigo, o desempenho de diferentes esquemas de seleção de *relay* é avaliado em termos da probabilidade de *outage* para uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, que consiste de múltiplos *relays* do tipo decodifica-e-encaminha operando em modo de retransmissão *full duplex*. Para tanto, quatro critérios de seleção de *relay* são considerados, a saber: (i) critério de seleção ótimo, que requer conhecimento global do estado de todos os enlaces da rede; e três critérios de seleção subótimos, os quais requerem conhecimento parcial dos estados de canal da rede, considerando (ii) os enlaces de auto interferência residual nos *relays*, (iii) os enlaces fonte-*relay* e (iv) os enlaces *relay*-destino. Considera-se ainda um esquema arbitrário de alocação de potência entre a fonte e o *relay* escolhido. Para esse cenário, o efeito combinado da temperatura de interferência no receptor primário, da potência máxima disponível nos nós secundários e da auto interferência nos *relays* é avaliado através de simulações exaustivas de Monte Carlo.

Palavras-Chave— Decodifica-e-encaminha, diversidade cooperativa, *full duplex*, probabilidade de *outage*, seleção de *relay*.

Abstract— In this paper, the performance of different relay selection schemes is assessed in terms of the outage probability for a cognitive relaying network with underlay spectral sharing, which consists of multiple decode-and-forward relays operating in full-duplex mode. Four relay selection criteria are considered, namely: (i) optimal selection criterion, which requires global knowledge of the channel state information in the network; and three suboptimal selection criteria, which require partial knowledge of the channel state information, considering (ii) the self-interference links at the relays, (iii) the source-relay links, and (iv) the relay-destination links. An arbitrary power allocation between the source and the selected relay is also considered. For this scenario, the joint effect of the interference temperature at the primary receiver, the maximum power available at the secondary nodes, and the self-interference at the relays is evaluated through exhaustive Monte Carlo simulations.

Keywords— Decode-and-Forward, cooperative diversity, full-duplex, outage probability, relay selection.

I. INTRODUÇÃO

As redes móveis celulares têm experimentado uma evolução gradual e constante até chegar às redes de quarta geração (4G), baseadas principalmente no padrão LTE (*Long Term Evolution*) [1]. Todavia, a proliferação crescente de dispositivos conectados impõe uma carga significativa nas redes

celulares atuais [2]. Nesse contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias é de primordial importância para o advento da próxima geração de sistemas de comunicação móvel, mais especificamente, as redes de quinta geração (5G), as quais preveem fornecer suporte a um número massivo de usuários, taxas de dados mais elevadas e latências extremamente baixas, constituindo assim uma melhora significativa na qualidade de serviço experimentada pelos usuários [3], [4].

Adicionalmente, a escassez de espectro figura como um dos principais problemas a serem superados para que as redes 5G se tornem uma realidade. Neste cenário, as técnicas de rádio cognitivo se destacam como uma solução promissora para o uso eficiente dos recursos do espectro radioelétrico. O conceito de rádio cognitivo permite que os nós de uma rede sem fio sejam capazes de obter conhecimento do entorno radioelétrico e adaptar seus parâmetros e configurações para acessar de maneira dinâmica às bandas de frequência licenciadas [5]. No âmbito das técnicas de rádio cognitivo, o compartilhamento espectral do tipo *underlay* mostra-se promissor para mitigar o problema da escassez de espectro, uma vez que possui baixa complexidade de implementação e flexibilidade em comparação aos esquemas *overlay* e *interweave* [6]. A técnica *underlay* permite que os usuários não licenciados, chamados de usuários secundários, obtenham acesso a uma banda licenciada, concedida aos usuários primários, contanto que um certo nível de interferência sobre a rede primária, denominado como temperatura de interferência, não seja excedido [6].

Por outro lado, o conceito de comunicações cooperativas tem-se destacado pelo potencial de atingir ganhos significativos de desempenho em termos de confiabilidade e extensão de cobertura [7], [8]. Esse conceito possibilita aos diferentes nós de uma rede sem fio, que normalmente possuem uma única antena, transmitir, além da sua própria informação, aquela oriunda de outros nós da rede, emulando um arranjo virtual de antenas, obtendo-se diferentes réplicas do sinal de interesse, originadas a partir dos diversos nós retransmissores espacialmente distribuídos.

Os principais protocolos de retransmissão que regem os esquemas de cooperação são: amplifica-e-encaminha (AF, *amplify-and-forward*) e decodifica-e-encaminha (DF, *decode-and-forward*) [9]. Em geral, o protocolo DF apresenta melhor desempenho ao longo de todo o intervalo de valores de relação sinal-ruído (SNR), já que o *relay* detecta, decodifica a informação vinda do nó fonte e a codifica novamente antes de retransmiti-la ao nó destino. Além disso, os *relays* podem operar em dois modos de retransmissão: *half duplex* (HD) e *full duplex* (FD). O modo FD possui melhor eficiência

Daniel de Paiva Mucin e Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista-SP, Brasil, E-mails: danielpaivamucin@hotmail.com, edgar.olivo@unesp.br.

Diana Pamela Moya Osorio, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP, Brasil, E-mail: dianamoya@ufscar.br.

Este trabalho foi financiado em parte pela Reitoria da UNESP e pelo CNPq.

espectral, pois o *relay* é capaz de receber e retransmitir a informação de maneira simultânea e na mesma banda de frequência, o que permite recuperar a perda de eficiência espectral inerente ao modo HD, que requer de canais ortogonais para a transmissão e recepção de informação [10]. Porém, o ganho em eficiência espectral do modo FD é obtido à custa da auto interferência sofrida na antena receptora do *relay*, a partir de sua própria antena transmissora, consequência da retransmissão simultânea.

Em vista disso, as redes cooperativas-cognitivas têm recebido especial atenção da comunidade científica, pois o uso combinado das técnicas de compartilhamento de espectro e de comunicações cooperativas possibilita melhorar simultaneamente a eficiência espectral e a confiabilidade da rede [11], [12]. Em particular, em [11], uma rede cooperativa-cognitiva *full duplex* sob o protocolo amplifica-e-encaminha com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, foi avaliada em termos da probabilidade de *outage*, para três esquemas de seleção de *relay*; no entanto, nesse trabalho foi desconsiderado o impacto do enlace direto no desempenho do sistema, cuja presença permite alcançar ganhos significativos de diversidade [12]. Por outro lado, em [12], uma rede cooperativa-cognitiva, que considera um esquema adaptativo de retransmissão sob o protocolo decodifica-e-encaminha, foi analisada em termos da probabilidade de *outage*, considerando a presença do enlace direto, porém, sem avaliar o ganho obtido a partir de esquemas de seleção de *relay*. Nesse contexto, este trabalho pretende contribuir no estudo de redes cooperativas-cognitivas, avaliando os efeitos do enlace direto e de diferentes esquemas de seleção de *relay* sobre o desempenho em termos da probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa-cognitiva *full duplex* sob o protocolo decodifica-e-encaminha.

II. MODELO DO SISTEMA

Considere uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, como mostrado na Fig. 1, consistindo de uma fonte S, um *cluster* de *relays* R_n , para $n = 1, \dots, N$, e um destino D, os quais operam sob a presença de um receptor primário P, respectivamente. Assume-se que todos os nós da rede possuem uma antena, com exceção dos *relays*, que são equipados com duas antenas (uma para transmissão e outra para recepção), a fim de viabilizar o modo de retransmissão *full duplex*. Denota-se por h_{SR_n} , $h_{R_n D}$ e h_{SD} os coeficientes de canal do n -ésimo primeiro salto, do n -ésimo segundo salto e do enlace direto na rede secundária, respectivamente; h_{SI_n} , para $n = 1, \dots, N$, o coeficiente do canal de auto interferência residual no n -ésimo *relay*, obtido após um processo de cancelamento (imperfeito) de interferência; e h_{SP} e $h_{R_n P}$ os coeficientes de canal dos enlaces de interferência de S para P e de R_n para P. Assume-se que todos os enlaces experimentam desvanecimento do tipo Rayleigh e que os coeficientes de canal respectivos são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.). Portanto, os ganhos de canal correspondentes, definidos como $g_A = |h_A|^2$, para $A \in \{SR_n, R_n D, SD, SI_n, SP, R_n P\}$, seguem distribuições exponenciais com valor médio $\Omega_A = E\{|h_A|^2\}$. Além disso, denota-se por I a temperatura de interferência

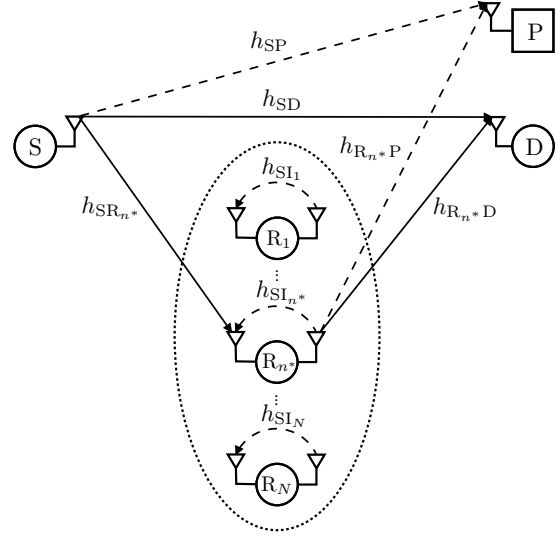


Fig. 1. Modelo do sistema (sinal de interesse: linha sólida; sinal de interferência: linha tracejada).

máxima tolerada pelo receptor primário P, causada simultaneamente por S e R. Logo, as potências transmitidas da fonte e do *relay*, P_S e P_{R_n} , devem satisfazer a seguinte restrição:

$$g_{SP}P_S + g_{R_n P}P_{R_n} \leq I, \quad (1)$$

em que

$$P_S = \alpha_1 \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{SP}} \right\}, \quad (2)$$

$$P_{R_n} = \alpha_2 \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{R_n P}} \right\}, \quad (3)$$

sendo P_t a potência transmitida máxima disponível em S e R_n , $0 \leq \alpha_1 \leq 1$ um fator de alocação de potência arbitrário entre S e R_n , e $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$, a fim de satisfazer a restrição dada em (1). Assim, as SNRs recebidas instantâneas no n -ésimo primeiro salto, n -ésimo segundo salto, enlace direto e n -ésimo enlace de auto interferência podem ser expressas como $\gamma_{SR_n} = g_{SR_n}P_S/N_0$, $\gamma_{R_n D} = g_{R_n D}P_{R_n}/N_0$, $\gamma_{SD} = g_{SD}P_S/N_0$ e $\gamma_{SI_n} = g_{SI_n}P_{R_n}/N_0$, respectivamente, em que P_S e P_{R_n} são dadas em (2) e (3), e N_0 é a potência do ruído AWGN (*additive white Gaussian noise*), presente no receptor dos terminais da rede. Definindo $\gamma_P \triangleq P_t/N_0$ como a SNR transmitida máxima dos nós secundários e $\gamma_I \triangleq I/N_0$ como a relação interferência-ruído máxima suportada pelo receptor primário, segue que γ_{SR_n} , $\gamma_{R_n D}$, γ_{SD} , e γ_{SI_n} podem ser expressas, respectivamente, como

$$\gamma_{SR_n} = \alpha_1 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{SP}} \right\} g_{SR_n}, \quad (4)$$

$$\gamma_{R_n D} = \alpha_2 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{R_n P}} \right\} g_{R_n D}, \quad (5)$$

$$\gamma_{SD} = \alpha_1 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{SP}} \right\} g_{SD}, \quad (6)$$

$$\gamma_{SI_n} = \alpha_2 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{R_n P}} \right\} g_{SI_n}. \quad (7)$$

III. PROBABILIDADE DE OUTAGE E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE RELAY

Para os critérios supracitados, o desempenho do sistema é avaliado em termos da probabilidade de *outage*, definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim recebida, γ , estar abaixo de um dado limiar τ , isto é [13]

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma < \tau). \quad (8)$$

Para o sistema sob análise, que considera uma rede cooperativa-cognitiva do tipo FD-DF, assume-se que os sinais provenientes de S e R_{n^*} são combinados em D, usando a técnica JD (*joint decoding*) [12], tal que a SNR do sinal resultante é dada pela soma das SNRs dos sinais a ser combinados. Portanto, a SNR fim-a-fim recebida instantânea é dada por

$$\gamma = \min\left(\frac{\gamma_{SR_{n^*}}}{1 + \gamma_{SI_{n^*}}}, \gamma_{R_{n^*}D} + \gamma_{SD}\right), \quad (9)$$

em que o índice n^* refere-se ao *relay* selecionado de acordo com um dos quatro critérios de seleção de *relay* apresentados em seguida.

A. Seleção Oportunista de Relay

Trata-se do critério de seleção ótimo, aqui denotado como ORS (*opportunistic relay selection*), já que requer conhecimento global da informação de estado de canal (CSI, *channel state information*) de todos os enlaces da rede. Neste critério, o *relay* escolhido R_{n^*} é aquele que maximiza a SNR fim-a-fim recebida instantânea em D. Portanto, tem-se que

$$n^* = \arg \max_n \left\{ \min\left(\frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}}, \gamma_{R_nD} + \gamma_{SD}\right) \right\}. \quad (10)$$

B. Seleção Parcial Baseada nos Enlaces de Auto Interferência

Trata-se de um critério subótimo, aqui denotado como PRS-SI (*partial relay selection based on self-interference links*), em que o *relay* escolhido R_{n^*} é aquele que possui a menor SNR recebida no enlace de auto interferência residual, γ_{SI_n} , a fim de minizar o impacto da mesma no processo de retransmissão de informação no *relay*. Portanto, segue que

$$n^* = \arg \min_n \{\gamma_{SI_n}\}. \quad (11)$$

C. Seleção Parcial Baseada nos Enlaces do Primeiro Salto

Neste critério, aqui denotado como PRS-1H (*partial relay selection based on first-hop links*), o *relay* escolhido R_{n^*} é aquele que maximiza a relação sinal-ruído-mais-interferência (SINR) recebida instantânea no primeiro salto, sendo assim um critério subótimo, em que

$$n^* = \arg \max_n \left\{ \frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}} \right\}. \quad (12)$$

D. Seleção Parcial Baseada nos Enlaces do Segundo Salto

Trata-se de um critério subótimo, aqui denotado como PRS-2H (*partial relay selection based on second-hop links*), em que o *relay* escolhido é aquele que maximiza a soma das SNRs recebidas instantâneas provenientes do enlace direto (comum a todos os *relays*) e do segundo salto, ou seja

$$n^* = \arg \max_n \{\gamma_{SD} + \gamma_{R_nD}\}. \quad (13)$$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, o desempenho de *outage* para os critérios de seleção de *relay* expostos na Seção III é avaliado por meio de simulações de Monte Carlo, considerando diferentes cenários ilustrativos. Considera-se uma topologia de rede bidimensional com distâncias normalizadas, em que a fonte, o *cluster* de *relays* e o destino da rede secundária estão localizados nas coordenadas (0;0), (0,5;0) e (1;0), respectivamente, e o receptor primário está localizado na coordenada (0,25;1). Assume-se que o ganho médio do canal entre um dado par de nós é $\Omega_A = d_A^{-\eta}$, para $A \in \{SR_n, R_nD, SD, SP, R_nP\}$, onde d_A é a distância entre os nós, e η é o expoente de perda de percurso. Estabelece-se $\eta = 4$ e o limiar alvo de SNR recebida instantânea $\tau = 0$ dB.

Na Fig. 2, o desempenho de *outage* versus a SNR transmitida do sistema, γ_P , é apresentado para os quatro critérios de seleção avaliados, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$. Assumiu-se que $\Omega_{SI_n} = -10$ dB, $\gamma_I = 20$ dB e $\alpha_1 = 0,5$ (ou seja, alocação igual de potência entre S e R_{n^*}). Note que, para $N = 1$, todos os critérios apresentam o mesmo desempenho, como esperado. Note ainda que, o critério oportunista possui um desempenho superior em relação aos critérios de seleção parcial, visto que explora o conhecimento global dos estados de canal da rede. No entanto, para a região de alta SNR, o critério PRS-1H, que é baseado na CSI do primeiro salto, apresenta mesmo desempenho que o critério oportunista. Portanto, a fim de diminuir o *feedback overhead* da rede, o uso do critério PRS-1H mostra ser mais eficiente. Por outro lado, observe que o critério PRS-SI apresenta um desempenho melhor comparado ao critério PRS-2H, que, interessantemente, apresenta degradação no desempenho conforme N aumenta. Isto se deve ao fato de que ao maximizar a SNR recebida do segundo salto de acordo com (13), o *relay* escolhido apresenta a SINR correspondente ao primeiro salto altamente comprometida também pela auto interferência, sendo o gargalo da comunicação, e esse efeito se acentua com o aumento de N .

A Fig. 3 ilustra o efeito da auto interferência dos *relays* no desempenho de *outage* do sistema para os critérios de seleção sob estudo, considerando dois valores de ganho médio do canal de auto interferência, $\Omega_{SI_n} = -5$ e -10 dB, e um número fixo de *relays*, $N = 3$. Assumiu-se que $\gamma_I = 20$ dB e $\alpha_1 = 0,5$. Note que as curvas de desempenho apresentam patamares em alta SNR, causado por dois fatores principais: a auto interferência presente no *relay* e a restrição de temperatura de interferência no receptor primário. Para baixos valores do ganho médio do canal de auto interferência (por exemplo, $\Omega_{SI_n} = -10$ dB), a probabilidade de *outage* é majoritariamente governada pela

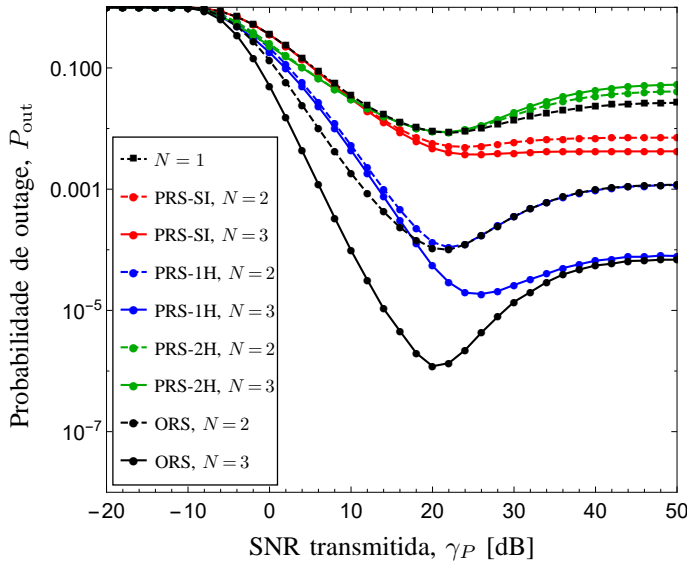


Fig. 2. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB; $\gamma_I = 20$ dB e $\alpha_1 = 0,5$.

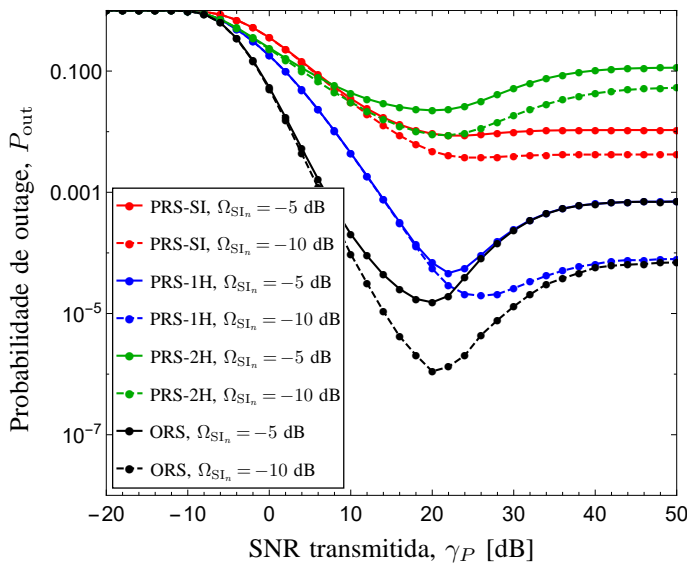


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número de *relays* $N = 3$; $\Omega_{SI_n} = -5$ e -10 dB; $\gamma_I = 20$ dB e $\alpha_1 = 0,5$.

restrição de temperatura de interferência, γ_I . Neste caso, observe que patamares são obtidos para um valor de SNR transmitida aproximadamente igual ao valor de γ_I , isto é, $\gamma_P \approx \gamma_I = 20$ dB. Por outro lado, conforme o ganho médio do canal de auto interferência aumenta, o desempenho de *outage* é deteriorado, como esperado, o que resulta em um aumento do nível do patamar nas curvas. Note ainda que, para valores diferentes de Ω_{SI_n} , o comportamento das curvas de desempenho é similar ao caso da Fig. 2. Isto é, o critério PRS-SI apresenta melhor desempenho em relação ao critério PRS-2H, enquanto que o desempenho do critério PRS-1H converge àquele apresentado pelo critério ótimo ORS em alta SNR.

A Fig. 4 apresenta o desempenho de *outage* do sistema para dois valores de restrição de temperatura de interferência no receptor primário, $\gamma_I = 10$ e 20 dB. Neste caso, usou-se

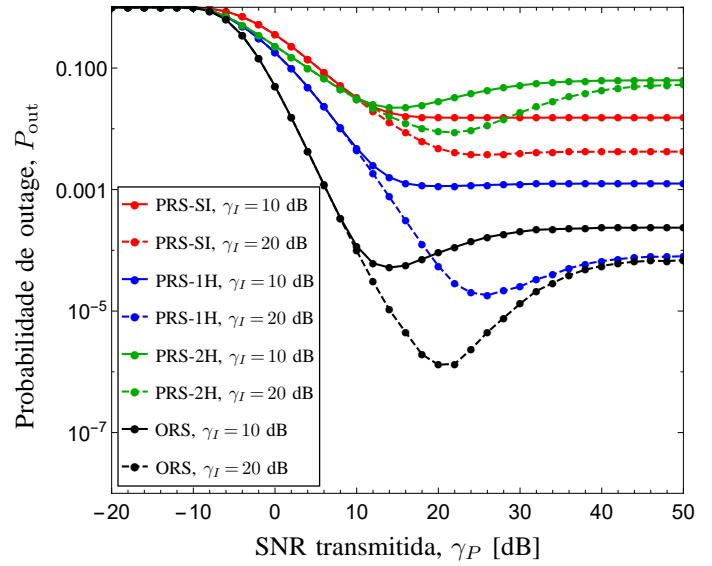


Fig. 4. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número de *relays* $N = 3$; $\gamma_I = 10$ e 20 dB; $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\alpha_1 = 0,5$.

$\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\alpha_1 = 0,5$, assumindo uma rede com um número de *relays* $N = 3$. Note que, para valores elevados de γ_I (por exemplo, $\gamma_I = 20$ dB), o desempenho de *outage* de todos os critérios de seleção considerados é melhorado, o que se reflete também na diminuição do nível dos patamares de *outage*. Neste caso, as curvas de desempenho são regidas majoritariamente pelo estado do enlace de auto interferência no *relay*, pois conforme a SNR transmitida aumenta, a SINR recebida do primeiro salto diminui, já que o efeito da auto interferência no *relay* é acentuado, constituindo-se no gargalo da comunicação entre S e D. Observa-se que, para o caso em que $\gamma_I = 10$ dB, o desempenho dos critérios PRS-1H e ORS não convergem no regime de alta SNR, como nos casos avaliados anteriormente. Portanto, para valores baixos de γ_I , a superioridade do critério de seleção ótimo (ORS) torna-se evidente. Já para valores elevados de γ_I (por exemplo, $\gamma_I = 20$ dB), ambos critérios convergem em alta SNR.

A Fig. 5 apresenta o impacto do fator de alocação de potência entre fonte e *relay* na probabilidade de *outage* do sistema. Para esse propósito, assumiu-se que $\gamma_I = 20$ dB, $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB. Observa-se que para todos os critérios avaliados, o desempenho de *outage* melhora com o aumento da potência alocada à fonte (aumento de α_1). Isto ocorre dado que, para um valor fixo de Ω_{SI_n} , o efeito da auto interferência é menos deletério a medida que a potência transmitida do *relay* diminui. Por outro lado, conforme o número de *relays* aumenta, observe que o ganho de desempenho dos critérios PRS-SI e PRS-2H é desprezível, enquanto que o ganho do critério ORS é sempre significativo.

A Fig. 6 mostra o desempenho de *outage* do sistema em função da distância normalizada entre a fonte e o *cluster* de *relays*, d_{SR_n} , tal que $0 < d_{SR_n} < 1$ e $d_{SR_n} + d_{R_nD} = 1$. Além disso, a fim de manter simetria com respeito a S e R_n , o receptor primário é localizado na coordenada $(d_{SR_n}/2, 1)$. Para este caso, usou-se $\gamma_I = 20$ dB, $\Omega_{SI_n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB. Note que, para o critério ORS, há um ganho significativo de desempenho em $d_{SR_n} \approx 0,4$, conforme N aumenta. Note

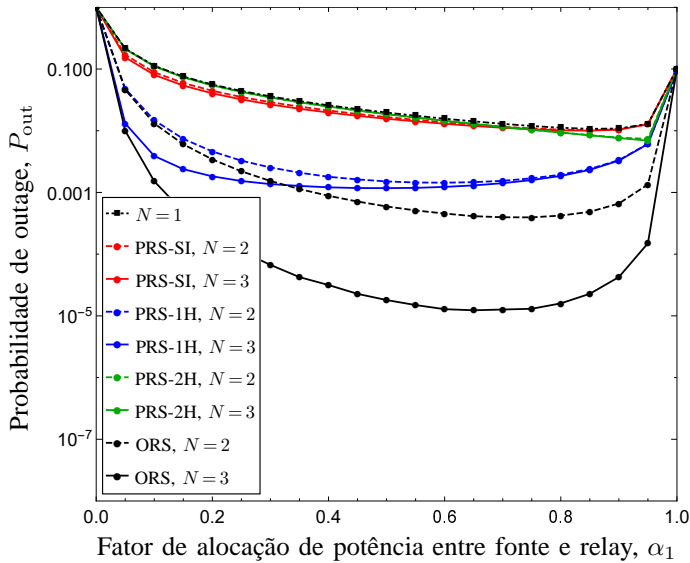


Fig. 5. Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência entre fonte e *relay*, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$; $\gamma_I = 20$ dB; $\Omega_{S_I n} = -10$ dB e $\gamma_P = 10$ dB.

ainda que, para o critério PRS-2H, o desempenho se deteriora rapidamente a medida que R_n se aproxima de D, já que ao maximizar a SNR recebida do segundo salto (vide (13)), esse critério não explora a diversidade espacial do enlace entre S e R_n , que possui um ganho médio do canal degradado para posições do *relay* próximas do destino, tornando-o o gargalo do sistema. Já para o critério PRS-1H, a partir de $d_{SR_n} \approx 0,5$, observa-se um ganho de desempenho conforme N aumenta, dado que o ganho médio do canal no primeiro salto é enfraquecido para essas posições do *relay*. No entanto, ao explorar a diversidade espacial deste enlace, o critério PRS-1H melhora o desempenho do sistema. Note também que os critérios PRS-1H e ORS apresentam convergência de desempenho a partir de $d_{SR_n} \approx 0,6$, enquanto que os critérios PRS-2H e ORS apresentam convergência para posições muito próximas de S. Por sua vez, o critério parcial PRS-SI praticamente não apresenta ganho de desempenho, já que o enlace de auto interferência não depende da distância entre S e R_n .

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa-cognitiva baseada em *relays* do tipo FD-DF foi avaliada para diferentes parâmetros-chave do sistema, considerando quatro critérios de seleção de *relay*. Constatou-se que a auto interferência presente nos *relays* do tipo FD pode degradar significativamente o desempenho do sistema. Constatou-se também que o critério de seleção oportunista apresentou o melhor desempenho, como esperado. Entretanto, na região de alta SNR, o critério PRS-1H, que considera a CSI do primeiro salto, atingiu o mesmo desempenho do critério de seleção oportunista. Assim, o uso do critério PRS-1H resulta ser mais eficiente para essa região em termos do *feedback overhead* requerido. Observou-se ainda que o critério de seleção PRS-SI, que considera apenas a CSI dos enlaces de auto interferência, apresentou melhor desempenho em relação ao critério PRS-2H, que é baseado principalmente na CSI

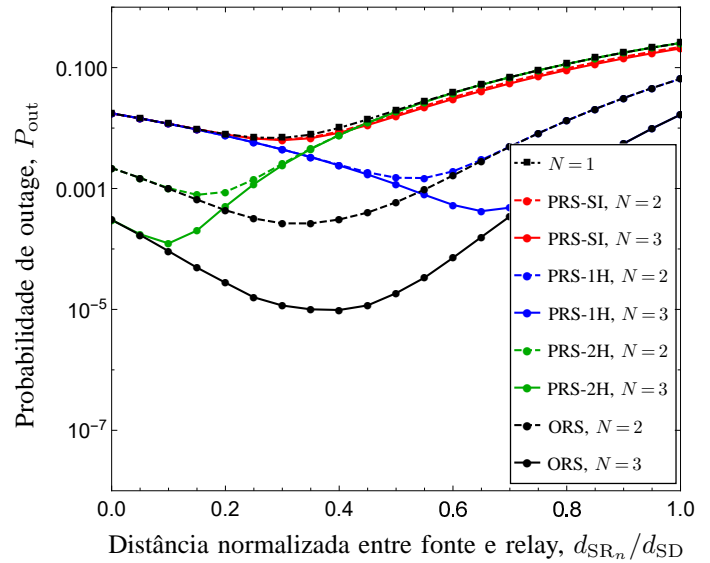


Fig. 6. Probabilidade de *outage* vs. distância normalizada entre fonte e *relay*, para os quatro critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays* $N = 1, 2, 3$; $\gamma_I = 20$ dB; $\Omega_{S_I n} = -10$ dB; $\gamma_P = 10$ dB e $\alpha_1 = 0,5$.

do segundo salto. Finalmente, determinou-se que patamares de desempenho são provocados por dois fatores: a auto interferência presente no *relay* e a restrição de temperatura de interferência no receptor primário.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3rd ed. Academic Press, 2016.
- [2] "Global mobile data traffic forecast update, 2014-2019," White Paper, Cisco, Feb. 2015. [Online]. Available: www.cisco.com.
- [3] C. X. Wang, F. Haider, X. Gao, X. H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [4] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, Thirdquarter 2016.
- [5] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [6] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, May 2009.
- [7] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, and G. Mao, "Relay technologies for WiMAX and LTE-Advanced mobile systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 10, pp. 100–105, Oct. 2009.
- [8] C. Hoymann, W. Chen, J. Montojo, A. Golitschek, C. Koutsimanis, and X. Shen, "Relaying operation in 3GPP LTE: Challenges and solutions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. 156–162, Feb. 2012.
- [9] J. Laneman, D. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [10] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of phy and mac layers," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2017–2046, Fourthquarter 2015.
- [11] Y. Deng, K. J. Kim, T. Q. Duong, M. Elkashlan, G. K. Karagiannis and A. Nallanathan, "Full-duplex spectrum sharing in cooperative single carrier systems," *IEEE Trans. Cognitive Commun. and Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 68–82, March 2016.
- [12] E. E. B. Olivo, D. P. M. Osorio, H. Alves, J. C. S. S. Filho, and M. Latva-aho, "An adaptive transmission scheme for cognitive decode-and-forward relaying networks: Half duplex, full duplex, or no cooperation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 5586–5602, Aug. 2016.
- [13] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.